



Università di Pisa

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica

Anno Accademico 2004/2005

Tesi di Laurea Specialistica

Progetto di un Flussimetro

Integrato in Microsistemi Fluidici

per Analisi Genetiche

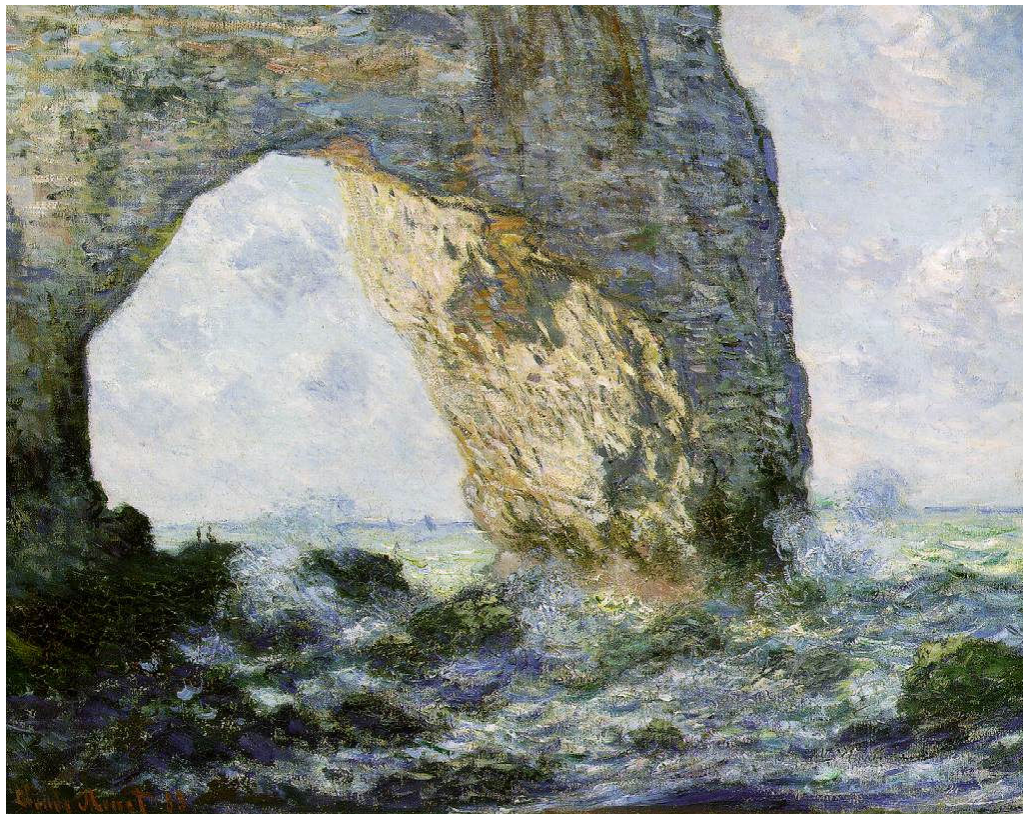
Candidato: **Valentina Donzella**

Relatori:

Prof. Andrea Nannini

Ing. Massimo Piotto

Ing. Antonio Molfese



La Manneporte à Etretat, Monet

Al di sotto di quei cristalli ben tagliati e di quella superficie congelata, vi è un flusso continuo, non comparabile a nulla di ciò che ho visto fluire. È una successione di stati, ciascuno dei quali preannunzia quello che lo segue e contiene quello che lo precede. In verità, essi non costituiscono stati molteplici se non quando già son passato oltre ad essi, e mi rivolgo indietro per osservarne la traccia: mentre li provavo erano così solidamente organizzati, così profondamente animati di una vita comune, che non avrei saputo dire dove uno qualsiasi di essi finisse e l'altro cominciasse. In realtà, nessuno di essi comincia o finisce, tutti si prolungano gli uni negli altri.

(Introduzione alla metafisica, Bergson)

Ringraziamenti

Forse queste pagine risulteranno in parte banali, ma sento il bisogno di condividere questo momento con le persone che, in questi anni universitari, mi hanno regalato qualcosa, in tanti modi diversi.

Per primi ringrazio la Mamma, Ingegnere, e il Papà, Fisico... sono figlia unica quindi nonostante i miei 23 anni li sento ancora fin troppo presenti ...ma sicuramente sono le persone che più stimo e che più sono di esempio nella mia vita. Per di più hanno avuto la pazienza di leggersi tutta questa tesi e di darmi degli utilissimi consigli e questo mi rende molto felice.

Ringrazio le mie adorabili nonne perché, anche se sono stata lontana da loro, le ho sempre sentite vicine, con la loro dolcezza e la loro immensa saggezza. Inoltre ringrazio tutti i miei parenti che mi hanno sempre fatto sentire speciale e amata e in particolare le mie cuginette Sofia, Mariaelena, Amanda e Lisa...il solo pensare a loro mi mette allegria. Un ventoso grazie a Ines, la mia istruttrice di vela, che è stata un po' una seconda mamma (meno apprensiva della prima, per fortuna), perché parte della mia determinazione la devo a lei.

Un ringraziamento molto sentito al professor Nannini, per avermi proposto questo argomento di tesi interessantissimo e affascinante; e all'Ingegnere Piotto, per i consigli fondamentali (soprattutto quelli finali!).

Grazie ad Antonio perché da febbraio fino ad ora mi ha sopportato quasi quotidianamente, in particolare lo ringrazio per i mesi di giugno e luglio in cui mi sono impossessata del suo computer e della sua scrivania in dipartimento...scherzi a parte, il potermi continuamente confrontare con lui è stato davvero

istruttivo. Grazie a Lucanos per la realizzazione rapidissima del primo prototipo del dispositivo e per tutti gli insegnamenti sui processi tecnologici. Un grazie a Dario e Pietro che mi hanno fatto compagnia in questi mesi e a Nick, che non hai mai distrutto il mio porta penne nonostante le continue minacce...

Vorrei ringraziare, inoltre, il Professor Diligenti e l'Ingegnere Barillaro perché lavorare con loro alla tesi di primo livello è stato molto istruttivo, oltre che interessante e piacevole.

Grazie a Mr. Wester e Mr. Mekkaoui, che sono stati dei supervisor gentili, disponibili e soprattutto molto competenti. Il lavoro svolto con loro quest'estate è stata un'esperienza formativa e gradevole.

Un grazie enorme ai *summer students* e ai dottorandi con cui ho condiviso la meravigliosa e indimenticabile esperienza al Fermilab, in particolare a Paperino che è l'anti-protone più veloce, simpatico e gentile degli States.

Un grazie infinito alla mia "Sore" e a Fede (il mio chitarrista preferito) perché le antennine funzionano sempre.

Grazie a quei colleghi che per cinque anni mi hanno preso il posto quando avevamo lezione la mattina, soprattutto i poveri Pina e Andrea (a malincuore hanno tollerato anche il mio braccialetto con il campanellino).

Grazie a tutto il gruppo dei TCM, che nell'ultimo anno mi ha fatto divertire e sentire un po' più a casa!

Tre grazie immensi a colui che, a fatica, mi ha scritto una cinquantina di mail quando ero a Chicago...grazie per il sostegno e gli incoraggiamenti, nonché per il mare, le favole e gli accenti...

Vorrei ringraziare anche il Direttore E. Tunonpuocapire Jr per la sua sconfinata disponibilità.

Indice

INTRODUZIONE	1
 Capitolo 1 - SENSORI DI FLUSSO INTEGRATI	3
1.1. I MEMS	4
1.2. Stato dell'Arte.....	7
1.3. Classificazione dei sensori di flusso	9
1.3.1. Sensori di flusso basati su effetti meccanici.	9
1.3.2. Sensori di flusso basati su effetti termici.	11
Anemometri	12
Sensori calorimetrici	13
<i>Time of flight sensors</i>	14
 Capitolo 2 - MICROSISTEMI PER ANALISI GENETICHE	16
2.1. I dispositivi LOC	17
2.1.1. Elementi costitutivi.....	19
Esempio di un chip MicroFluidico	20
2.1.2. Test genetici	21
2.2. Processi microfluidici nei LOC	22
2.3. Tecnologia per la realizzazione dei LOC.....	24
2.3.1. Tecniche di lavorazione del substrato.....	25
 Capitolo 3 - BASI DEI FENOMENI ELETTROCINETICI IN MICROFLUIDICA	28
3.1. Il Doppio Strato Elettrico (EDL).....	29
3.1.1. La carica superficiale all'interfaccia solido-liquido	30
3.1.2. Strato compatto e strato diffuso	31
3.1.3. Distribuzione degli ioni vicino all'interfaccia.	33
Potenziale esterno e distribuzione di Boltzmann.	35
3.1.4. Analisi dell'EDL	35
3.2. Equazione di Nerst-Planck.....	38
3.3. Soluzione dell'equazione di Poisson-Boltzmann vicino ad una superficie piana.....	40
Caso di una superficie piana immersa in una soluzione acquosa "infinita"	41
3.4. Tipi di fenomeni elettrocinetici.....	45
<i>Streaming Potential</i>	45
Elettroosmosi	45
Elettroforesi	46
3.5. Flusso elettroosmotico nei microcanali	48
3.5.1. Flusso fra due piatti paralleli	49

3.5.2. Flusso elettroosmotico in un microcanale rettangolare ..	51
3.5.3. Descrizione analitica del flusso elettroosmotico	53
Variazioni del profilo di velocità del flusso.....	56
3.6. Conseguenze dell'effetto Joule su un flusso elettroosmotico .	59
3.7. Moto elettroforetico delle molecole nei microcanali	62
3.7.1. Moto di una molecola sferica in un microcanale	63

Capitolo 4 - ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI DI MICROSISTEMI FLUIDICI

4.1. Femlab® 3.1.....	69
4.1.1. MEMS <i>module</i>	70
4.2. Andamento del potenziale su possibili sezioni dei microcanali	72
4.2.1. Sezione rettangolare	72
4.2.2. Sezione di possibili canali reali.....	79
4.3. Applicazione di potenziali esterni agli estremi dei microcanali	83
4.4. Simulazioni di convezione e conduzione termica nei microcanali	90
4.4.1. Simulazioni e possibili metodi di misura della velocità del flusso	105
Struttura a tre elementi	106
Struttura a un solo elemento	107
4.4.2. Utilizzo dei file Matlab.....	109
Esempio: confronto della risposta ottenuta da due simulazioni	111
4.5. Analisi e confronto di diverse implementazioni del sensore	113
4.5.1. Tre elementi, immersi nel canale.....	113
4.5.2. Un solo elemento, immerso nel canale	119
4.5.3. Tre elementi, nel vetro, distanti dal canale	123
4.5.4. Un solo elemento nel vetro, distante dal canale	129
4.6. Analisi delle prestazioni del sensore in funzione dei metalli usati	132

Capitolo 5 - PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DEL DISPOSITIVO....

5.1. Materiali e configurazione del sensore.....	139
5.1.1. Caratteristiche delle RTD usate e montaggio a ponte di Wheatstone	140
5.1.2. Bonding dei vetrini e isolamento del dispositivo	143
5.1.3. Caratteristiche delle resistenze evaporate.....	146
5.2. Simulazioni 2D del dispositivo	149
5.2.1. Simulazioni 3D dei fenomeni di conduzione del calore sul dispositivo	156
5.3. Disegno del layout	160
5.4. Realizzazione del microcapillare con il sensore di flusso.....	163

5.4.1. Attacco del vetro per definire il microcapillare	163
5.4.2. Bonding dei vetrini e realizzazione delle resistenze	166
5.5. Sviluppi futuri.....	168

CONCLUSIONI	172
--------------------------	------------

APPENDICE: LISTATI MATLAB	174
--	------------

Simulazione Parametrica in Funzione della Distanza Fra Sensori e Riscaldatore	174
Simulazione Parametrica in funzione della Velocità del Flusso Elettroosmotico nel Microcanale	177
Simulazione Parametrica in funzione della Potenza Dissipata dal Riscaldatore	181

BIBLIOGRAFIA	185
---------------------------	------------